

利用含镍污泥和赤泥固废资源提取镍铁研究

经文波, 黄儒德, 任佳龙

(百色学院材料科学与工程学院, 广西 百色 533000)

[摘 要] 针对目前含镍固废大量堆存及现有技术能耗高、成本高的问题, 本文利用含铁赤泥黏性强的特性, 将其与含镍污泥造球后, 采用固态中高温直接还原-磨磁选工艺提取镍铁, 并按照4因素3水平正交试验方法进行了最佳工艺参数试验, 得出如下结论。将含铁赤泥与含镍污泥造球后协同还原提取镍铁的工艺可行, 试验最佳工艺参数为配煤比4%、焙烧温度1 150℃、焙烧时间45 min、磨矿时间30 min; 此条件下, 提取的镍铁粉镍品位75.00%以上、镍铁品位93.00%以上, 镍铁回收率达到80.00%以上, 按镍铁95%品位校正后的经济指标为料成本475元/t以下、能耗712 kgce/t以下、CO₂排放0.99 t/t以下。试验中发现影响镍铁提取工艺料成本、能耗和CO₂排放的因素从强到弱为配煤比→焙烧温度→磨矿时间→焙烧时间。与现有含镍固废处理工艺相比, 该工艺不仅在低能耗、低排放条件下实现了含镍污泥和含铁赤泥的镍铁提取利用, 还减少了固废堆存, 所生产的镍铁合金可以供给钢铁企业生产高附加值不锈钢, 还原后剩余的氧化物主要成分为SiO₂、Al₂O₃、CaO和MgO, 可用于生产水泥原料。

[关键词] 含镍污泥; 赤泥; 镍铁; 焙烧还原; 磁选; 回收率; 能耗; CO₂排放

[中图分类号] TF125.1⁺3; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)06-0018-06

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.06.003

0 引言

我国是世界上的铝制品生产大国, 在铝制品生产过程中产生大量的含镍污泥固体废弃物, 按照铝制品生产规模, 广西每年含镍污泥排放量预计2 000 t左右, 全国预计每年30 000 t以上。截至目前, 含镍污泥仅有少量用于充填矿井, 小部分经火法或湿法工艺回收有价金属, 大量含镍污泥堆积在渣场, 造成了镍资源的浪费, 还占用土地, 对环境产生严重影响。

镍是一种重要的有价金属, 具有较好的耐腐蚀、耐高温等性能, 在不锈钢、合金及电池领域的应用不断增加。2022年11月纯镍价格达到20万元/t, 因此镍的回收具有很大的经济价值。

国内外综合利用含镍固废的方法主要有还原提

镍^[1-2]、冶炼钢铁产品^[3]、制作微晶玻璃^[4-5]、生产混凝土^[6-7]以及矿山填埋^[8-9]五大类。芬兰Harjavalta镍厂于1990年进行了从含镍固废中回收镍的相关试验, 结果表明在100 kVA的电弧炉中加入7%的碳后, 镍回收率为97%^[10]。喻正军等^[11]用还原硫化法从镍转炉渣中回收镍, 还原剂、硫化剂与炉渣的质量百分比分别为3.5%、25%, 熔炼温度为1 360℃, 保温时间为3 h, 该条件下镍回收率为96.08%。Pan等^[12]用煤粉作还原剂, 控制合适的炉渣碱度以及还原温度等条件, 将镍闪速炉渣还原, 缓冷后进行磁选分离, 得到含镍3.25%的精矿, 镍回收率达到82.20%。现有的含镍固废处理方法中, 湿法冶金需酸溶, 成本高; 还原熔炼法能耗高, 含镍10%镍铁能耗在700 kgce/t以上, CO₂排放在2.29 t/t以上; 直接还原磨磁选法生产镍, 镍回收率低, 小于90.00%; 制作微晶玻璃、生产混凝土以及矿山填埋等方法, 不能充分利用含镍固废中的镍资源。

本文依托广西某企业含镍污泥处理项目, 针对含镍污泥分散、黏结性差, 而含铁赤泥黏性强的特点, 创新性提出(含镍污泥+含铁赤泥)造球-中高

[收稿日期] 2022-06-15 [修订日期] 2022-07-29

[录用日期] 2022-07-31 [出版日期] 2022-10-28

[作者简介] 经文波(1963—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 教授级高级工程师, 从事高炉和非高炉炼铁, 冶金固废资源利用。

[引用格式] 经文波, 黄儒德, 任佳龙. 利用含镍污泥和赤泥固废资源提取镍铁研究[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(6): 18-23.

温直接还原-磨磁选工艺,由于中高温直接还原技术在固态下进行,可有效减少能耗。与现有含镍固废处理工艺相比,该工艺不仅在低能耗、低排放条件下实现了含镍污泥和含铁赤泥的镍铁提取利用,还减少了固废堆存,所生产的镍铁合金可以供给钢铁企业生产高附加值不锈钢,还原后剩余的氧化物主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO ,可用于生产水泥原料。

1 试验部分

1.1 原料和燃料

广西某铝制品企业年产 500 t 含镍污泥,该污泥

主要组成为:氧化镍 11% ~ 12%,氧化铝 25% ~ 26%,氢氧化铝 7% ~ 8%,硅酸锡 5% ~ 6%;次要矿物:隐品质泥质 34% ~ 35%,氧化钙 5% ~ 6%,有机物 9% ~ 10%。样品呈深褐黑色,泥状,粒径 2 ~ 65 mm,烘干后样品呈土状。试验中用到的含镍污泥、赤泥、燃料的成分如表 1 所示。含铁赤泥作为黏结剂使用。

1.2 试验方法与原理

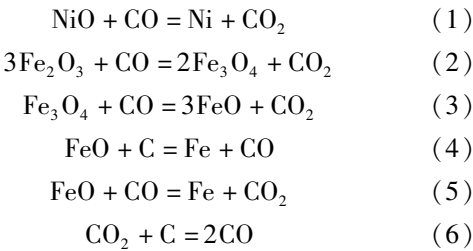
将破碎、磨细、筛分得到的 - 200 目含镍污泥、含铁赤泥固废资源和煤粉,按一定比例配料,混匀造球。生成球团经筛分烘干后,进入高温炉焙烧,在还原气氛下还原,焙烧温度 1 000 ~ 1 150 ℃,还原时间

表 1 原料及燃料数据

Table 1 Raw materials and Fuels data

原料	成分										单价/ (元·t ⁻¹)
	TFe/%	NiO/%	CaO/%	MgO/%	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	P/%	S/%	灰分/%	C/%	
含镍污泥	—	11.00	6.00	3.65	15.15	26.00	0.002	0.02	—	—	0
赤泥	24.85	—	8.74	0.28	14.98	17.45	0.060	0.27	—	—	50
煤粉(灰分)	—	—	27.76	1.51	36.44	11.72	—	0.75	14.00	77.00	1 000

30 ~ 50 min,生球团在还原炉内受热反应生成的固态 DRI 球团;球团出炉后经水冷,送去一段磨矿磁选法处理,磁场强度 3 600 Oe,提取的镍铁经过烘干得到还原镍铁粉。整个工艺主要反应见式(1) ~ (6)。其中,(1)为氧化镍还原反应,(2) ~ (3)为铁氧化物的逐级还原反应,(4)为 FeO 直接还原反应,(5)为 FeO 间接还原反应,(6)为 CO_2 与 C 的溶损反应。



含镍污泥提取镍铁生产工艺流程见图 1。

2 正交试验

配料比例如表 2 所示,按 4 因素 3 水平正交试验 $\text{L}_9(3^4)$ 方法试验,按物理热 70% 利用率计算能耗,按镍铁 95% 品位校正成本、能耗和 CO_2 排放指标。

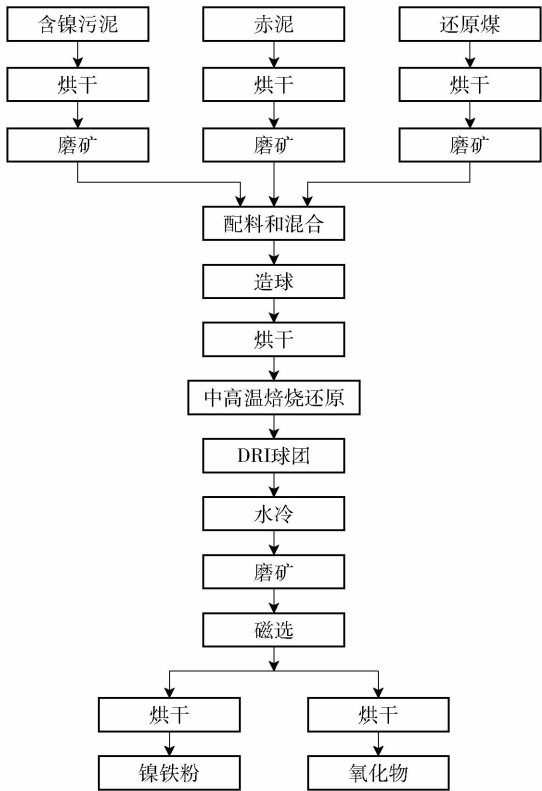


图 1 含镍污泥提镍铁工艺流程

Fig. 1 Ferronickel extraction process from nickel sludge

表 2 配料表
Table 2 List of ingredients

序号	名称	含镍污泥/%	赤泥/%	煤/%	合计/%
1	A	95	5	4	104
2	B	95	5	6	106
3	C	95	5	8	108

3 分析与结果

4 因素 3 水平 $L_9(3^4)$ 正交试验的原始试验数据见表 3, 根据表 3 数据计算分析, 提炼出配煤比、焙烧温度、焙烧时间和磨矿时间影响两种固废协同还原镍铁的各项指标数据, 分别见表 4、表 5、表 6、表 7。

表 3 试验数据统计
Table 3 Statistics of experimental data

序号	名称	恒温加热		磨磁选		镍铁粉品位		渣中 镍铁/ %	回收率		料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)	按镍铁 95% 品位校正		
		温度/ ℃	时间/ min	磨矿 时间/ min	磁场 强度/ Oe	镍/ %	镍铁 合计/ %		镍/ %	镍铁 合计/ %				料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)
1	A	1 050	40	30	3 600	55.52	76.60	4.38	71.93	70.84	425	635	0.88	527	788	1.09
2	A	1 100	45	35	3 600	78.27	93.33	5.88	70.90	70.27	522	783	1.09	531	797	1.11
3	A	1 150	50	40	3 600	75.76	93.33	3.77	79.51	78.58	467	699	0.97	475	712	0.99
4	B	1 050	45	40	3 600	68.31	87.50	5.17	67.44	66.69	754	881	1.85	819	957	2.01
5	B	1 100	50	30	3 600	74.08	91.67	4.47	73.37	72.57	726	848	1.78	752	879	1.84
6	B	1 150	40	35	3 600	72.42	86.49	5.71	72.28	71.63	694	810	1.70	762	890	1.87
7	C	1 050	50	35	3 600	79.12	92.31	4.54	75.36	74.73	934	1 129	2.46	961	1 162	2.53
8	C	1 100	40	40	3 600	74.67	90.91	3.25	79.65	78.77	872	1 055	2.30	911	1 102	2.40
9	C	1 150	45	30	3 600	79.92	95.00	1.44	91.92	90.85	790	956	2.08	790	956	2.08

表 4 配煤比的影响
Table 4 Influence of coal blending

配煤比	镍铁粉品位		渣中 镍铁/%	回收率		料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)	按镍铁 95% 品位校正		
	镍/%	镍铁合计/ %		镍/%	镍铁合计/ %				料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)
4%	69.85	87.75	4.68	70.62	73.23	471	706	0.98	511	765	1.06
6%	71.60	88.55	5.12	67.49	70.30	725	846	1.78	778	908	1.91
8%	77.90	92.74	3.08	80.93	81.45	865	1 047	2.28	887	1 073	2.34
极差	8.05	4.99	2.04	13.44	11.15	394	341	1.30	376	308	1.28

表 5 焙烧温度的影响
Table 5 Influence of roasting temperature

焙烧温度	镍铁粉品位		渣中 镍铁/%	回收率		料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)	按镍铁 95% 品位校正		
	镍/%	镍铁合计/ %		镍/%	镍铁合计/ %				料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)
1 050 ℃	67.65	85.47	4.70	67.57	70.75	704	882	1.73	769	969	1.88
1 100 ℃	75.67	91.97	4.53	71.88	73.87	707	895	1.72	732	926	1.79
1 150 ℃	76.03	91.61	3.64	79.58	80.35	650	822	1.58	676	852	1.64
极差	8.39	6.50	1.06	12.00	9.60	57	73	0.16	93	117	0.24

表 6 焙烧时间的影响
Table 6 Influence of roasting time

焙烧时间	镍铁粉品位		渣中 镍铁/%	回收率		料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)	按镍铁 95% 品位校正		
	镍/%	镍铁合计/ %		镍/%	镍铁合计/ %				料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)
40 min	67.54	84.67	4.45	71.21	73.75	664	833	1.63	734	927	1.79
45 min	75.50	91.94	4.16	74.30	75.94	689	873	1.67	713	903	1.73
50 min	76.32	92.44	4.26	73.53	75.29	709	892	1.74	730	917	1.79
极差	8.78	7.77	0.29	3.09	2.19	45	59	0.11	16	24	0.06

表 7 磨矿时间的影响
Table 7 Influence of grinding time

磨矿时间	镍铁粉品位		渣中 镍铁/%	回收率		料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)	按镍铁 95% 品位校正		
	镍/%	镍铁合计/ %		镍/%	镍铁合计/ %				料成本/ (元·t ⁻¹)	能耗/ (kgce·t ⁻¹)	CO ₂ 排放/ (t·t ⁻¹)
30 min	69.84	87.76	3.43	76.25	78.09	647	813	1.58	690	874	1.67
35 min	76.60	90.71	5.38	70.24	72.21	717	907	1.75	752	950	1.84
40 min	72.91	90.58	4.06	72.53	74.68	698	878	1.71	735	923	1.80
极差	6.76	2.95	1.95	6.01	5.88	70	94	0.17	62	76	0.17

3.1 配煤比的影响

配煤比的影响如表 4 所示。由表中数据可得出:随着配煤比提高,虽然镍铁还原反应得到改善,还原提镍铁后镍铁粉中镍品位和镍铁品位提高,镍铁回收率总趋势提高,但耗炭增加,料成本、能耗、CO₂排放增加,按镍铁 95% 品位校正后的料成本、能耗、CO₂排放也增加。从节能角度出发,配煤以 4% 较好,虽然镍铁粉镍品位 69.85%、镍铁品位 87.75%、镍铁回收率 73.23% 较低,但料成本 471 元/t、能耗 706 kgce/t、CO₂ 排放 0.98 t/t 以及按 95% 品位校正后的料成本 511 元/t、能耗 765 kgce/t、CO₂ 排放 1.06 t/t 均最低。

3.2 焙烧温度的影响

焙烧温度的影响如表 5 所示。表 5 表明,焙烧温度升高,有助于改善镍铁还原反应,提高镍铁粉中镍品位、镍铁品位和镍铁回收率。焙烧温度 1 150 ℃ 时,镍铁粉镍铁品位 91.61%、镍回收率 79.58%、镍铁回收率达到试验最高值 80.35%;成本 650 元/t、能耗 822 kgce/t、CO₂ 排放 1.58 t/t,均达到试验最低值;按 95% 品位校正后的料成本 676 元/t、能耗 852 kgce/t、CO₂ 排放 1.64 t/t,也是试验最低值。

3.3 焙烧时间的影响

焙烧时间的影响如表 6 所示。表 6 表明,焙烧

时间过短,镍铁还原反应不充分;焙烧时间适当延长,镍铁粉中镍品位和镍铁品位及镍铁回收率也提高;但焙烧时间过长(50 min),炭消耗过多,还原效果变差,虽然镍铁粉品位升高,但镍铁粉镍铁回收率下降,料成本、能耗、CO₂ 排放增加;按镍铁 95% 品位校正后,焙烧时间过短或过长,料成本、能耗、CO₂ 排放指标均较高,以焙烧时间 45 min 为较好。此条件下,镍铁回收率达到最高值 75.94%,按 95% 品位校正后,CO₂ 排放 1.73 t/t,达到最低。

3.4 磨矿时间的影响

磨矿时间的影响如表 7 所示。表 7 表明,磨矿时间延长,镍铁粉过细,损失增加,虽然镍铁粉品位提高,但镍铁粉镍铁回收率下降,料成本、能耗、CO₂ 排放升高,按镍铁 95% 品位校正后料成本、能耗、CO₂ 排放也升高。以磨矿时间 30 min 为较好,此条件下,镍铁粉镍铁品位 87.76%,镍铁回收率 78.09% 最高,料成本 647 元/t、能耗 813 kgce/t、CO₂ 排放 1.58 t/t 最低,按镍铁 95% 品位校正后的料成本 690 元/t、能耗 874 kgce/t、CO₂ 排放 1.67 t/t 也最低。

3.5 影响因素排序

综合表 4~7 中的数据,按极差由强到弱影响因素排序。①镍铁粉中镍品位:焙烧时间→焙烧温

度→配煤比→磨矿时间;②镍铁粉中镍铁品位:焙烧时间→焙烧温度→配煤比→磨矿时间;③镍铁粉中镍回收率:配煤比→焙烧温度→磨矿时间→焙烧时间;④镍铁粉中镍铁回收率:配煤比→焙烧温度→磨矿时间→焙烧时间;⑤料成本:配煤比→磨矿时间→焙烧温度→焙烧时间;⑥能耗:配煤比→磨矿时间→焙烧温度→焙烧时间;⑦CO₂排放:配煤比→磨矿时间→焙烧温度→焙烧时间。

按镍铁 95% 品位校正后,对影响料成本、能耗和 CO₂ 排放的因素由强到弱排序。①料成本:配煤比→焙烧温度→磨矿时间→焙烧时间;②能耗:配煤比→焙烧温度→磨矿时间→焙烧时间;③CO₂ 排放:配煤比→焙烧温度→磨矿时间→焙烧时间。

综上所述,影响各项指标的主要因素是配煤比,其次是焙烧温度和磨矿时间,最后是焙烧时间。以配煤比为 4%、焙烧温度 1 150 ℃、焙烧时间 45 min、磨矿时间 30 min 为最优工艺条件,获得的镍铁粉中镍品位 75.00% 以上、镍铁品位 93.00% 以上,镍铁回收率达到 80.00% 以上;按镍铁 95% 品位校正后的经济指标为料成本 475 元/t 以下、能耗 712 kgce/t 以下、CO₂ 排放 0.99 t/t 以下。

4 结论

本文将含镍污泥与含铁赤泥造球后,采用中高温直接还原-磨磁选工艺提取镍铁,并按照 4 因素 3 水平正交试验方法进行了试验,得出如下结论。

1) 利用含铁赤泥黏性强的特点,将其与含镍污泥造球后协同还原提取镍铁的工艺可行,试验最佳工艺参数为配煤比 4%、焙烧温度 1 150 ℃、焙烧时间 45 min、磨矿时间 30 min。此条件下,提取的镍铁粉镍品位 75.00% 以上、镍铁品位 93.00% 以上,镍铁回收率达到 80.00% 以上;按镍铁 95% 品位校正后的经济指标为料成本 475 元/t 以下、能耗 712 kgce/t 以下、CO₂ 排放 0.99 t/t 以下。

2) 试验中发现影响镍铁提取工艺料成本、能耗和 CO₂ 排放的因素从强到弱为配煤比→焙烧温度→磨矿时间→焙烧时间。

与现有含镍固废处理工艺相比,该工艺不仅在低能耗、低排放条件下实现了含镍污泥和含铁赤泥的镍铁提取利用,还减少了固废堆存,所生产的镍铁合金可以供给钢铁企业生产高附加值不锈钢,还原后剩余的氧化物主要成分为 SiO₂、Al₂O₃、CaO 和

MgO,可用于生产水泥原料。

[参考文献]

- [1] 郭亚光,朱荣,王云,等. 镍渣煤基熔融还原提铁工艺基础研究[J]. 工业加热,2015,44(6):40-43.
GUO Yaguang, ZHU Rong, WANG Yun, et al. The fundamental research to extract iron from the nickel slag by smelting reduction process[J]. Industrial Heating, 2015,44(6):40-43.
- [2] 李小明,李怡,邢相栋. 镍渣煤基直接还原过程中金属铁颗粒的生长特性[J]. 钢铁,2020,55(3):104-109.
LI Xiaoming, LI Yi, XING Xiangdong. Particle growth characteristics of metallic iron in direct coal-based reduction of nickel slag[J]. Iron and Steel,2020,55(3):104-109.
- [3] 郝文义. 金川冶炼渣综合利用研究钢铁冶金部分试验初步小结[J]. 甘肃冶金,1995(2):23-27.
HAO Wenyi. Study on Comprehensive Utilization of Jinchuan Smelting Slag [J]. Gansu Metallurgy, 1995 (2) : 23-27.
- [4] 滕永波,王中杰,倪文. 富铁冶金渣玻璃陶瓷的制备及结晶现象研究[J]. 硅酸盐学报,2015(2):395-400.
TENG Yongbo, WANG Zhongjie, NI Wen. Preparation and crystallization of iron-rich metallurgical slag glass ceramics [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015(2): 395-400.
- [5] 周琦,南雪丽,易育强,等. 镍渣微晶玻璃制备及铁的回收利用[J]. 兰州理工大学学报,2010,36(5):14-18.
ZHOU Qi, NAN Xueli, YI Yuqiang, et al. Preparation of glass-ceramics with nickel slag and recovery of iron from nickel slag[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2010,36(5): 14-18.
- [6] 盛广宏,翟建平. 镍工业冶金渣的资源化[J]. 金属矿山,2005(10):68-71.
SHENG Guanghong, ZHAI Jianping. Making metallurgical slag from nickel industry a resource [J]. Metal MINE, 2005(10): 68-71.
- [7] 孟渊,田斌守,邵继新,等. 利用冶炼工业废弃物镍渣研制混凝土储热材料[J]. 混凝土与水泥制品,2015(2):93-95.
MENG Yuan, TIAN Binshou, SHAO Jixin, et al. Development of concrete Heat storage Materials using Nickel slag from smelting industry [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(2): 93-95.
- [8] 高术杰,倪文,李克庆,等. 用水淬二次镍渣制备矿山充填材料及其水化机理[J]. 硅酸盐学报,2013,41(5):612-619.
GAO Shujie, NI Wen, LI Keqing, et al. Preparation and hydrated mechanism of mine filling material of water-granulated secondary nickel slag [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(5): 612-619.
- [9] 李克庆,冯琳,高术杰. 镍渣基矿井充填用胶凝材料的制备[J]. 工程科学学报,2015,37(1):1-6.
LI Keqing, FENG Lin, GAO Shujie. Preparation of cementitious materials for backfilling by using nickel slag [J]. Chinese Journal of Engineering, 2015,37(1): 1-6.
- [10] JONES R T, HAYMAN D A, DENTON G M. Recovery of cobalt,

nickel, and copper from slags, using DC-arc furnace technology [C]. Montreal, Canada, 1996:451 – 466.

[11] 喻正军,冯其明,欧乐明,等. 还原硫化法从镍转炉渣中富集钴镍铜[J]. 矿冶工程,2006,26(1):49 – 55.

YU Zhengjun, FENG Qiming, OU Leming, et al. Recovery of cobalt, nickel and copper from nickel converter slag by reduction-sulfurization process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006,26(1): 49 – 55.

[12] PAN Jian, ZHENG Guolin, ZHU Deqing, et al. Utilization of nickel slag using selective reduction followed by magnetic separation [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(11):3421 – 3427.

Study on ferronickel extracted from solid waste resources of
nickel-bearing sludge and red mud

JING Wen-bo, HUANG Ru-de, REN Jia-long

(School of Materials Science and Engineering, Baise University, Baise 533000, China)

Abstract: In view of large amount of nickel-containing solid waste stockpiling and high energy consumption and cost of the existing technology, the paper makes use of strong viscosity of iron-containing red mud, carries out pelletizing it with nickel containing sludge, and solid medium high temperature direct reduction-grinding magnetic separation process to extract ferronickel, and conducts the test according to the orthogonal method $L_9(3^4)$ with four factors and three levels, and draws the following conclusions. It is feasible to extract ferronickel from iron-containing red mud and nickel-containing sludge by synergistic reduction after pelletizing. The optimum process parameters are as follows: coal blending ratio 4%, roasting temperature 1 150 °C, roasting time 45 min, and grinding time 30 min; under the above conditions, the nickel grade of ferronickel powder is above 75.00%, ferronickel grade is above 93.00%, and ferronickel recovery is above 80.00%. According to 95% grade correction, the material cost is below 475 RMB/t, energy consumption below 712 kgce/t and CO₂ emission below 0.99 t/t. In the test, it was found that the factors affecting the cost of ferronickel extraction process materials, energy consumption and CO₂ emissions were changed in the weakening order: coal blending ratio, roasting temperature, grinding time and roasting time. Compared with the existing nickel-containing solid waste treatment process, this process not only realizes the extraction and utilization of ferronickel from nickel-containing sludge and iron-containing red mud under the conditions of low energy consumption and low emission, but also reduces the stacking of solid waste. The ferronickel alloy produced can be used for steel enterprises to produce high value-added stainless steel. The main components of the remaining oxides after reduction are SiO₂, Al₂O₃, CaO and MgO, which can be used to produce cement raw materials.

Key words: nickel-containing sludge; red mud; ferronickel; roasting and reduction; magnetic separation; recovery; energy consumption; CO₂ emission